基于专利文献的“卡脖子”技术识别研究——以数控机床领域为例*1

曹琨[1,2]，吴新年[1,2]，白光祖[1]，郑玉荣[1]，靳军宝[1]，李莉[3]
1. 中国科学院西北生态环境资源研究院　兰州　730000；2. 中国科学院大学经济与管理学院　北京　100049；3. 中国工程科技创新战略研究院　北京　100088

摘要：[目的/意义] “卡脖子”技术是现阶段制约我国战略性新兴产业高质量发展的关键瓶颈，为实现产业链自主安全可控，高效准确识别“卡脖子”技术十分必要。**[方法/过程]** 本研究以专利文献作为数据来源，首先根据技术共现网络测度并遴选关键核心技术，其次基于技术差距及技术经济安全的视角，综合考虑了后发优势与自主创新能力的关系，从技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位和自主可控能力这四个维度设计“卡脖子”技术识别指标体系，然后运用 CRITIC-TOPSIS 方法构建了一套系统的“卡脖子”技术识别模型，最后在数控机床领域进行实证研究。**[结果/结论]** 应用本研究提出的方法识别的结果是，我国在数控机床领域存在 34 项潜在“卡脖子”技术，主要集中在数控机床控制或调节系统、数控机床关键功能部件、车削或镗削数控机床、电数字数据处理等领域，将此结果与美国商业出口管制清单进行对比，具有较好的一致性，由此验证了本方法的可行性和可靠性。

关键词： “卡脖子”技术　CRITIC-TOPSIS 法　技术识别　数控机床
分类号： G250.7

21 世纪以来，以新一代信息技术为代表的新兴技术正成为全球产业变革和经济增长的重要驱动力，并可能重构全球竞争格局和改变价值链地位，受到全球许多国家和地区的高度重视[1-2]。这些新兴技术商业化过程兼具资本和技术密集型特征，在全球技术贸易及产业发展中更易受到技术创新和贸易管制因素的影响[3]。随着新冠疫情对全球经济的重创和中美贸易摩擦不断加剧，逆全球化趋势逐渐显现。美国拜登总统上台以来，其科技政策范式发生新的变化——由市场机制为主导、以政府鼓励创新、维护知识产权等手段为辅助的传统政策模式，转变为国家对科技政策的极大干预，并展开全方位政策精准调整和国际布局[4]，中美“技术脱钩”的可能性增大，被“卡脖子”的风险加剧。如何避免在这些领域的“卡脖子”技术上被“一剑封喉”，实现产业链自主安全可控，是现阶段我国战略性新兴产业高质量发展的核心任务[5]，因此在这种形势下，开展“卡脖子”技术精

---

*本文系国家社会科学基金项目“演化视角下新兴技术形成机制与识别方法研究”（项目编号：20BTQ094）和中国工程院紧急重点咨询项目“技术贸易安全管理前沿研究”（项目编号：2021-JZ-10）研究成果之一。

作者简介： 曹琨(ORCID：10000-0003-1913-2591)，博士研究生；吴新年(ORCID:0000-0002-7865-9548)，研究员，博士，博士生导师，通讯作者，E-mail:wuxn@lzb.ac.cn；白光祖(ORCID:0000-0001-9055-1700)，研究馆员，博士；郑玉荣(ORCID:0000-0001-7340-6077)，副研究馆员，硕士；靳军宝(ORCID：0000-0002-7582-6515)，副研究馆员，博士；李莉，助理研究员，博士。

准量化识别显得十分必要[6]。

由于“卡脖子”问题受政治、经济、技术等多因素耦合影响，如何厘清“卡脖子”技术的内涵和本质特征，进而精准、量化地识别“卡脖子”技术成为当前研究的难点，也是实现产业经济安全风险监测、评估和预警的基础，学术界尚未形成通用的、系统的“卡脖子”技术识别方法。因此，本研究以专利文献作为数据来源，首先通过技术共现网络识别关键核心技术，并基于技术差距及技术经济安全的视角构建了四维“卡脖子”技术识别模型，最后结合 CRITIC-TOPSIS 综合评价的方法遴选出优势技术和“卡脖子”技术。在此基础上，本文以数控机床领域为例进行“卡脖子”技术的识别，并结合美国商业出口管制清单，验证了本方法的有效性和可行性。

1 研究现状

“卡脖子”技术是由非正式学术领域转化而来的术语，具有很强的情境性。一般认为，“卡脖子”技术属于关键核心技术领域范畴，然而相比于关键核心技术还具有其他特征。学者们对“卡脖子”技术的内涵特征进行了深入研究，但仅在“卡脖子”技术的高价值以及安全性方面形成共识，还有学者认为“卡脖子”技术应具有“致命性”、“胁迫性”、“商品性”、“战略性”、“垄断性”、“复杂性”等特征[12-19]。总体来看，“卡脖子”技术研究主要集中在国内，相关学者主要从技术差距[7]、技术轨道[8]、创新生态系统[9]、高科技竞争[10]、大国竞争[11]和国家战略[12]等不同视角，对“卡脖子”技术的概念、形成机理、内涵特征、破解路径等方面进行了研究，促进了对“卡脖子”技术的认识和理解。

在形成机理方面，学者们主要从技术轨道、技术差距、技术经济安全等方面进行研究。如邢冬梅等[8]认为，“卡脖子”问题是立项偏差、技术、市场和制度等各因素综合作用的结果，“卡脖子”现象是我国作为“追随者”必然面临的局面。技术差距理论认为国家间的技术差距是国际技术贸易的基础，Posner 等[22]最早提出了技术追赶模型，认为随着技术扩散或引进国际技术，差距最终会趋于收敛，然而该模型并不符合广大发展中经济体被“低端锁定”的现实情况：一方面发达国家通过技术转让获得高额回报并由此致力于新的创新，使发展中国家落入“引进－落后－再引进－再落后”的循环[23]；另一方面当技术差距较小时，技术创新国为了保证自身收益往往采取关键核心技术垄断、技术封锁等措施，从而制约了追赶型国家产业技术超越途径，出现“卡脖子”问题。因此 Russell 等[24]在此基础上提出新积累论，认为技术差距最终是否收敛并不确定，这取决于其内生影响因素。刘志鹏等[25]进一步指出，国家间的技术转移可能会形成依赖关系，如果技术创新能力不足，依赖关系会持续存在，由此带来了技术经济安全风险，出现“卡脖子”问题。

在技术识别方法方面，基于专家评价的德尔菲法被认为是技术预见最有效方法之一，常常被应用到“卡脖子”技术的甄选和研判过程中，如陈劲等[7]构建了“卡脖子”技术识别“金字塔”模型，汤志伟等[14]通过问卷调查法识别出 13 项电子信息产业的“卡脖子”技术，郑国雄等[15]采用层次分析法甄选“卡脖子”技术，赵君彦等[16]基于产业链与创新链协同视角甄选“卡脖子”关键技术，然而专家评价的方法在数据收集和分析过程中部分指标不易获得和量化，可操作性差，且有可能造成主观偏差，需要消耗大量的人力物力，一般适用于国家层面；基于专利数据的定量分析方法可以为专家判断提供辅助，弥补专家判断主观性较强的缺陷，实现了一定程度上的精准量化识别，如唐恒等[19]通过构建技术—功效—机构三维分析模型识别“卡脖子”技术，董坤等[20]在省域视角下通过技术数量优势

和质量优势指标识别“卡脖子”技术，江瑶等[21]通过前沿技术性、复杂创新性和国家战略性等特征构建两阶段漏斗式甄选模型遴选关键核心技术及“卡脖子”技术，此外部分学者开始将机器学习[26]、深度学习[27]的方法纳入到“卡脖子”技术识别研究，进一步提高了识别的准确率，然而人工智能模型到目前为止仍然存在可解释性差的问题。

当前，基于文献计量的研究从不同视角和定义出发构建了各自的“卡脖子”技术识别模型，然而尚未形成通用的、系统的“卡脖子”技术识别方法。尽管当前相关研究考虑了技术价值、战略竞争力、技术垄断以及技术差距等因素，但对于“卡脖子”技术的经济安全风险研究还存在不足之处，并未考虑内生因素在突破技术依赖瓶颈和解决“卡脖子”问题中所起的作用。随着我国产业向全球价值链高端迈进，外部竞争形势日益严峻，技术经济安全问题日益凸显[28]，坚持科技自立自强[29]，提高关键核心技术领域的自主可控能力，是解决“卡脖子”问题的根本途径，也是识别“卡脖子”技术的重要衡量指标。这是因为只有当自主可控能力较低且存在相对技术差距时，才容易被“卡脖子”，而当自主可控能力较高时，即使存在相对技术差距，也能够迅速地突破这一技术瓶颈。

为了更全面、客观地识别领域内的“卡脖子”技术，本研究以专利文献为研究对象，从技术差距和技术经济安全的视角出发，对“卡脖子”技术所属范畴及内涵特征进行了梳理，同时，综合考虑了后发优势与自主创新能力在突破“卡脖子”技术方面的重要作用，设计了一个包含技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位和自主可控能力四个维度的指标体系，并采用 CRITIC-TOPSIS 方法对指标进行客观赋权和综合评价，建立了一套系统的“卡脖子”技术量化识别模型。最后，为验证本方法的可行性，以数控机床领域为例进行实证研究，通过与美国商业出口管制清单（Commerce Control List，CCL）进行对比，验证了识别结果的有效性和准确性。

2 研究方法

本文认为，“卡脖子”技术符合关键核心技术的一般特征，因此将“卡脖子”技术纳入关键核心技术范畴，首先通过社会网络分析的方法构建技术共现网络，并利用加权的 Pagerank 值衡量技术的关键核心程度，并结合 K-Means 算法确定关键核心技术的阈值，从而遴选出关键核心技术；然后，本研究基于技术差距及技术经济安全的视角，设计了一个包含技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位和自主可控能力四个维度的指标体系；最后运用 CRITIC-TOPSIS 方法测算“卡脖子”技术的综合得分，并结合相关指标的阈值遴选出潜在的“卡脖子”技术及优势技术，技术路线如图 1 所示。

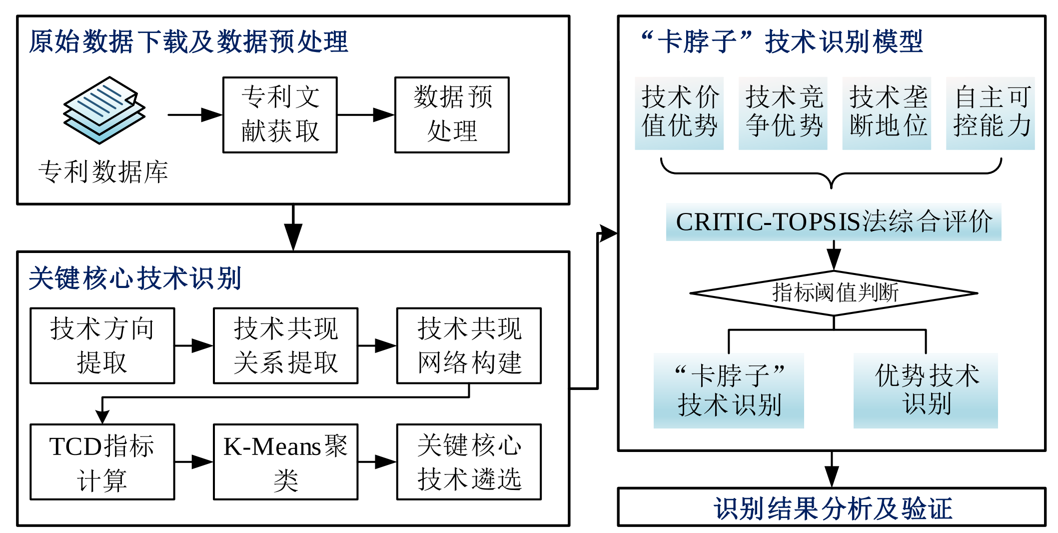


图 1 “卡脖子”技术识别框架

2.1 “卡脖子”技术的内涵特征

“卡脖子”问题受政治、经济、技术等多因素耦合影响，然而究其本质，卡脖子技术形成的根本原因是旧模式与新阶段的内生性矛盾，而技术出口管制等因素是其外部契机[13]。本研究在前人基础上，结合“卡脖子”技术的形成机理，从技术差距及技术经济安全的视角出发，厘清“卡脖子”技术的内涵和本质特征，从而精准、量化地识别“卡脖子”技术。本研究认为“卡脖子”技术符合关键核心技术的一般特征，此外，还具有四个重要特征：首先“卡脖子”技术应具有高技术价值，只有高价值的技术才能影响未来产业发展走向并为产业带来超常的经济利润；其次“卡脖子”技术与国际经济和科技竞争密切相关，尤其在战略性新兴产业领域内的竞争尤为激烈，因而具有战略竞争性特征；此外，“卡脖子”技术往往是某个产业链的关键核心技术，技术的复杂性决定其在短时间内难以被突破，首先攻克“卡脖子”技术的一方将拥有巨大的竞争优势，且容易形成垄断[7]，还具有技术垄断性特征；最后，考虑到“卡脖子”对国家经济安全的重要影响，只有增强产业链自主可控能力才能有效破解当前面临的“卡脖子”问题，因此识别“卡脖子”技术还应重视技术的自主可控能力。并且，“卡脖子”技术是相对的概念，只有当我国与主要竞争国家在技术价值、技术竞争、技术垄断和自主可控这四个方面都存在较大差距，均处于相对劣势地位时才容易被“卡脖子”，因此，本文基于这样的认识提出了“卡脖子”技术识别的四个重要指标：技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位和自主可控能力。

2.2 数据来源

专利文献代表了全球绝大多数的技术成果，本文以发明专利作为数据来源，并对同族专利文本进行合并。虽然相较于标准必要专利、四方专利和 PCT 专利，发明专利的技术价值和战略竞争性较低，可能存在近年来中国相关专利申请数量大幅增长但是与创新能力不匹配问题。然而，在特定领域的研究中，发明专利所包含的数据更加全面，并且本研究在设计指标体系时重视量与质、后发优势与自主创新能力的作用，从而更加客观、全面地识别“卡脖子”技术。在专利的分类体系中，当前 CPC 分类体系更加准确，但部分专利文献尚未进行 CPC 分类，应用较多的仍然是 IPC 分类。本文以 IPC 大组来表征专利文献的技术方向，虽然 IPC 小组的技术粒度更细，但是 IPC 小组之间还存在复杂的上下位关系，因此 IPC 大组更为适合表征专利文献的技术方向。

2.3 关键核心技术遴选

在关键核心技术的识别及遴选方面，情报学界开展了大量的研究工作，主要研究方法包括：社会网络分析法[30]、指标体系[36]、NPCIA 算法[31]、主题模型[32]、机器学习[33]等方法。其中社会网络分析法得到较为广泛的应用，本研究基于专利共现网络，充分利用网络的拓扑结构特征，借鉴陈伟等[34]人的方法，采用 PageRank 指标识别网络中关键节点。PageRank 是由 Sergey Brin 等[35]提出的确定谷歌搜索结果中网页相关性和重要性排序的算法，该算法通过网络间超链接关系进行投票而确定页面等级，但 PageRank 算法未考虑节点权重，因此本文以相关专利申请数量作为节点权重，构建技术核心度指数（Technical core degree，TCD）遴选关键核心技术，计算公式为：

$$\mathrm{TCD} = \ln\left(\mathrm{PageRank}_i \times N_i\right) \tag{1}$$

其中，$\mathrm{PageRank}_i$ 表示 i 技术方向在专利共现网络中的 PageRank 值，N_i 表示在 i 技术方向相关专利的申请数量。将 TCD 值按照从大到小的顺序绘制曲线，并借鉴杨武等[36]的方法将该曲线分为关键核心技术、重要技术和一般技术三个区域。然后，采用 K-Means 算法[37]将数据分为三类以确定关键核心技术的阈值，并根据研究者的经验和实际结果进行调整。

2.4 “卡脖子”技术识别指标体系

本研究遵循科学性、系统性、典型性、可比性的构建原则，以国际专利分类中的 IPC 大组作为基础，从关键核心技术的技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位和自主可控能力四个维度来识别潜在“卡脖子”技术，并选择具有代表性的数据来源进行测算。

（1）技术价值优势（Technological value advantage，TVA）。专利文献的技术价值受技术、经济、法律等复杂因素的影响，通常采用指标体系进行专利价值评估，国内外相关机构开发了诸多专利价值评估工具[38]，包括 Innography 强度指标、国家知识产权局提出的专利价值分析指标等，其中 incopat 自创的“合享价值度”考虑了技术先进性等 20 多个指标，具有较高的准确性，是学界常用的指标之一[20,39]。本文参考了“合享价值度”作为专利技术价值的计算来源，以某国在特定技术方向技术价值占全球该技术方向技术价值的比重，与该国在全领域技术价值占全球所有领域技术价值比重的比值，来测度该国的技术价值优势，计算公式为：

$$\mathrm{TVA} = \left(v_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{m} v_{ij}\right) \Big/ \left(\sum_{j=1}^{n} v_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} v_{ij}\right) \tag{2}$$

其中，i 表示目标产业专利所属国家（i = 1, 2, ⋯ , m），j 表示目标产业专利所含技术方向（j = 1, 2, ⋯ , n），下同；v_{ij} 表示 i 国家在 j 技术方向专利的合享价值度之和；$\sum_{i=1}^{m} v_{ij}$ 表示各国家 i 在 j 技术方向专利的合享价值度之和；$\sum_{j=1}^{n} v_{ij}$ 表示 i 国家在各技术方向 j 专利的合享价值度之和；$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} v_{ij}$ 表示各国家在各技术方向专利的合享价值度之和。该指标为相对性指标，当目标国家为中国时，可计算出我国在各技术方向的技术价值优势，若 TVA 指数>1 时表示我国在该方向存在技术价值优势，等于 1 表示基本均衡，<1 表示处于相对劣势低位。

（2）技术竞争优势（Technological competitive advantage，TCA）。专利权人在不同国家或地区多次申请的同族专利能够获得更大的地域保护范围，同族专

利数量和同族国家数量越多，专利投入成本增加，但是市场保护范围越大、潜在的市场价值也越大[21]。以同族专利数和同族国家数的加权拟合值测算专利的竞争力指标（Patent competition，PC），计算公式为：

$$\mathrm{PC}=\omega_1\times N_f+\omega_2\times N_c \tag{3}$$

其中，N_f 表示专利的同族专利数，Nc 表示专利的同族国家数，ω_1 及 ω_2 为各自权重，通过 CRITIC 方法进行标准化及客观赋权。以某国在特定技术方向专利竞争力占全球该技术方向专利竞争力的比重，与该国在全领域专利竞争力占全球所有领域专利竞争力比重的比值，来测度该国的技术竞争优势，计算公式为：

$$\mathrm{TCA}=\left(\mathrm{PC}_{ij}/\sum_{i=1}^{m}\mathrm{PC}_{ij}\right)/\left(\sum_{j=1}^{n}\mathrm{PC}_{ij}/\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\mathrm{PC}_{ij}\right) \tag{4}$$

其中，PC_{ij} 表示 i 国家在 j 技术方向的专利竞争力；$\sum_{i=1}^{m}\mathrm{PC}_{ij}$ 表示各国家 i 在 j 技术方向的专利竞争力之和；$\sum_{j=1}^{n}\mathrm{PC}_{ij}$ 表示 i 国在各技术方向 j 的专利竞争力之和；$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\mathrm{PC}_{ij}$ 表示各国家在各技术方向的专利竞争力之和。

（3）技术垄断地位（Technological monopoly position，TMP）。专利权人应根据公平、合理、无歧视的原则向被许可方收取许可费，然而当专利权人集中度过高时，少数专利权人往往占据市场支配地位并容易形成技术垄断。技术垄断地位指数的测算方式主要来源于市场集中度指数（HHI，简写为 H），该指数能较好测度市场垄断性[40]，计算公式为：

$$H=\sum_{k=1}^{N}\varphi_k^2 \tag{5}$$

其中 φ_k 为目标产业内第 k 个专利权人申请的专利数量占该产业所有专利数量的比例，N 为产业内所有专利权人数量。本文以某国在特定技术方向市场集中度占全球该技术方向市场集中度的比重，与该国家在全领域市场集中度占全球所有领域市场集中度比重的比值，来测度该国家的技术垄断地位，计算公式为：

$$\mathrm{TMP}=\left(H_{ij}/\sum_{i=1}^{m}H_{ij}\right)/\left(\sum_{j=1}^{n}H_{ij}/\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}H_{ij}\right) \tag{6}$$

其中，H_{ij} 表示 i 国家在 j 技术方向的市场集中度指数；$\sum_{i=1}^{m}H_{ij}$ 表示各国家 i 在 j 技术方向的市场集中度之和；$\sum_{j=1}^{n}H_{ij}$ 表示 i 国在各技术方向 j 的市场集中度之和；$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}H_{ij}$ 表示各国家在各技术方向的市场集中度之和。

（4）自主可控能力（Autonomous controllability，AC）。自主可控能力指标主要通过技术主导力、技术引领性和技术被引率三个维度进行加权拟合。目标国家在特定技术方向掌握的核心专利数量占比越高，技术主导力越强，参考郑玉荣等[41]的方法遴选核心专利，以此为基础测度技术主导力指标（Technological dominance，TD），其计算方式为：

$$\mathrm{TD}=CP_{ij}/\sum_{i=1}^{m}CP_{ij} \tag{7}$$

其中，CP_{ij} 表示 i 国家在 j 技术方向的核心专利数量；$\sum_{i=1}^{m} CP_{ij}$ 表示各国家 i 在 j 技术方向的核心专利数量。

目标国家在特定技术领域萌芽期申请的核心专利数量占比越高，对该领域的技术发展的引领性更强。采用 Logletlab 软件对全领域技术生命周期进行拟合并确定该领域技术发展的萌芽期[42]，以此为基础测度技术引领性指标（Technology leadership，TL），计算方式为：

$$\text{TL} = cp_{ij} / \sum_{i=1}^{m} cp_{ij} \tag{8}$$

其中，cp_{ij} 表示 i 国家在 j 技术方向的萌芽期核心专利数量；$\sum_{i=1}^{m} cp_{ij}$ 表示各国家 i 在 j 技术方向的萌芽期核心专利数量。

引证专利能够表征专利文献的技术基础，引证专利中某国家被引专利数量占比越高，表明该国的应用研究基础越好，自主可控能力越高。用特定技术方向的所有引证专利文献中某国被引专利数量占比来表征该国的技术被引率（Technology cited rate，TCR），计算公式为：

$$\text{TCR} = Cited_{ij} / \sum_{i=1}^{m} Cited_{ij} \tag{9}$$

其中，$Cited_{ij}$ 表示 i 国家在 j 技术方向的专利前向引用次数，$\sum_{i=1}^{m} Cited_{ij}$ 表示各国家 i 在 j 技术方向专利前向引用次数之和。

2.4 CRITIC-TOPSIS 综合评价

本文采用 CRITCI 方法对指标进行客观赋权，该方法综合考虑了数据的对比强度和冲突性这两项指标，消除了相关性较强的指标对最终结果的影响，并减少指标之间的信息重叠，更有利于得到可信的评价结果。其计算方法是：首先基于各指标值构建决策矩阵 $A = (X_{ij})_{m\times n}$，其中 m 表示评价指标的个数，n 为待评价的对象个数，x_{ij} 为第 i 个待评对象关于评价指标 x_j 的评价值（$i = 1, 2, \cdots, n$; $j = 1, 2, \cdots, m$）[43]。由于各指标的量纲不统一，且均为正向指标，按式（10）进行数据归一化处理；其次按照式（11）和（12）计算冲突性及对比强度指标；最后按式（13）计算各指标的权重。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \tag{10}$$

式中，y_{ij} 表示归一化处理后的矩阵。

$$V_j = \frac{\sigma_j}{\overline{y_j}} \tag{11}$$

式中，V_j 为第 j 项指标的变异系数，σ_j 为第 j 项的标准差，$\overline{y_j}$ 为第 j 项指标的平均数。

$$T_j = \sum_{i=1}^{m} \left(1 - \frac{\sum_{h=1}^{n} \left(y_{hi} - \overline{y}_i\right)\left(y_{hj} - \overline{y}_j\right)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{n} \left(y_{hi} - \overline{y}_i\right)^2 \sum_{h=1}^{n} \left(y_{hj} - \overline{y}_j\right)^2}} \right) \tag{12}$$

式中，T_j 为冲突性指标，y_{hi} 和 y_{hj} 为第 h 个评价对象的第 i 项和第 j 项指标值。

$$\omega_j = \frac{V_j \times T_j}{\sum_{j=1}^{m} V_j \times T_j} \tag{13}$$

式中，ω_j为各测度指标权重，并结合 TOPSIS 法进行综合得分计算。TOPSIS 法根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度，对现有对象进行相对优劣排序，在多目标决策分析中十分有效[44]。其计算步骤如下：①根据式（10）进行数据无量纲化处理；②以规范化矩阵中各一级指标的最大值表示正理想解，以最小值表示负理想解，并计算各评价对象与它们之间的欧氏距离；③根据式（14）计算各 IPC 大组的综合评价得分。

$$f_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \tag{14}$$

式中，f_i 为各 IPC 大组的综合评价值，d_i^- 和 d_i^+ 分别表示各 IPC 大组到正负理想的欧氏距离。f_i 值介于 0～1 之间，该值愈接近 1，说明评价方案愈接近最优水平，反之，愈接近最劣水平，即被“卡脖子”的可能性越大。

2.5 “卡脖子”技术识别

根据“卡脖子”技术识别的四个测度指标及综合评价得分遴选“卡脖子”技术：如果技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位三个指标得分大于 1，且自主可控能力及综合得分大于 0.5，则该技术被视为我国在该领域的相对优势技术，综合评价得分越高，相对优势也越大。反之，如果技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位指标得分均小于 1，且自主可控能力及综合得分均小于 0.5，则该技术被视为潜在“卡脖子”技术，综合评价得分越接近于 0，则表示技术差距越大，被“卡脖子”的可能性也越大。

3 实证研究

3.1 数据收集

本文以数控机床技术领域作为实证对象，选择全球发明专利作为数据来源，吕璐成等[45]采用词嵌入的方法研究了 CCL 清单与专利的映射关系，表明专利数据作为“卡脖子”技术数据来源的可靠性。专利数据来自 incopat 数据库，参考梁帅等[45]人的检索策略下载数据，考虑到专利数据的滞后性，选择 1960-2021 年的数据，并按照专利家族进行合并，最终获得了 23014 条专利文本记录（检索时间为 2023.02.25），采用 Python 进行数据预处理和技术方向提取等步骤。

3.2 关键核心技术遴选

通过构建 IPC 大组共现网络，计算各技术方向的 TCD 指数，并借助 SPSSPRO 软件的 K-Means 算法将数据分为三类，以确定关键核心技术的阈值。随后，根据实践结果进行调整，最终选择了该指数排名 TOP 5%的技术方向作为关键核心技术，共遴选出 88 个关键核心技术。

3.3 指标体系计算

根据公式（2）~（9）分别计算数控机床领域各 IPC 大组的“卡脖子”技术识别指标，然后按式（10）~（13）分别计算各指标权重，结果如图 2 所示。其中技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位和自主可控能力四项指标的权重分别为 21.40%、30.61%、28.25%，19.75%。可以看出，技术竞争优势及技术垄断地位指数的权重较高，在识别数控机床技术领域的“卡脖子”技术时起主要作用。在自主可控能力指标的二级指标中，技术引领性指标的权重最高（40.57%），其次为技术被引率（30.06%）和技术主导力（29.37%）。

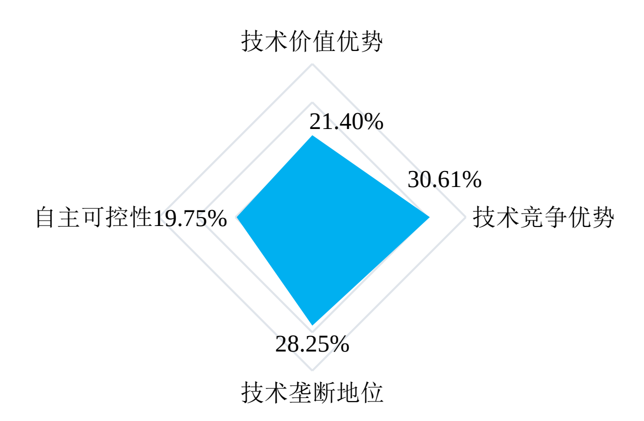


图 2 “卡脖子”技术识别指标权重

3.4 有效性检验

根据各技术方向识别指标计算值，采用 SPSSPRO 软件中的因子分析法评估整个识别指标体系的结构效度。检验结果如表 1 所示，其中 KMO 检验值为 0.811，Bartlett 球形检验的显著性值为 0（P<0.01），在水平上呈现显著性，因此拒绝原假设，表明各变量间具有相关性，适合进行因子分析，测度指标体系的设计较为合理。

表 1 KMO 检验和 Bartlett 检验

检验方式	项目	检验值
KMO 检验	KMO 值	0.811
Bartlett 球形度检验	近似卡方	497.111
	df	6
	P	0.000***

3.5 TOPSIS 综合评价

采用 TOPSIS 综合评价的方法计算各技术方向的综合得分情况，首先构建最优和最劣矩阵向量，其次计算正理想解距离或负理想解距离（欧式距离），并根据式（14）计算综合得分，最终计算结果如表 2 所示。

表 2 数控机床领域“卡脖子”技术识别综合评价结果

序号	IPC 大组	TVA	TCA	TMP	AC	综合得分
1	G05B19	0.52	0.51	0.07	0.23	0.11
2	B23Q15	0.19	0.22	0.01	0.09	0.04
3	B23Q17	0.66	0.68	0.31	0.27	0.14
4	B23Q11	1.52	1.88	1.68	0.50	0.34
5	B23Q3	1.42	1.72	1.45	0.52	0.32
6	B23Q1	1.34	1.13	2.34	0.54	0.33
7	B23Q5	1.01	0.93	0.74	0.43	0.22
8	B23Q7	1.38	1.74	1.65	0.47	0.32
9	B23Q41	0.16	0.12	0.03	0.10	0.04
…	…	…	…	…	…	…
88	B23F5	0.84	0.34	1.20	0.37	0.20

3.6 识别结果分析

基于以上计算结果，根据优势技术及“卡脖子”技术的遴选方法，在数控机床领域共识别出 6 项优势技术和 34 项潜在“卡脖子”技术，采用 Python 的 matplotlib 库分别根据技术价值优势、技术竞争优势、技术垄断地位、自主可控能力和综合得分情况构建三维可视化图谱（如图 3 所示），其中节点大小表示自主可控能力。

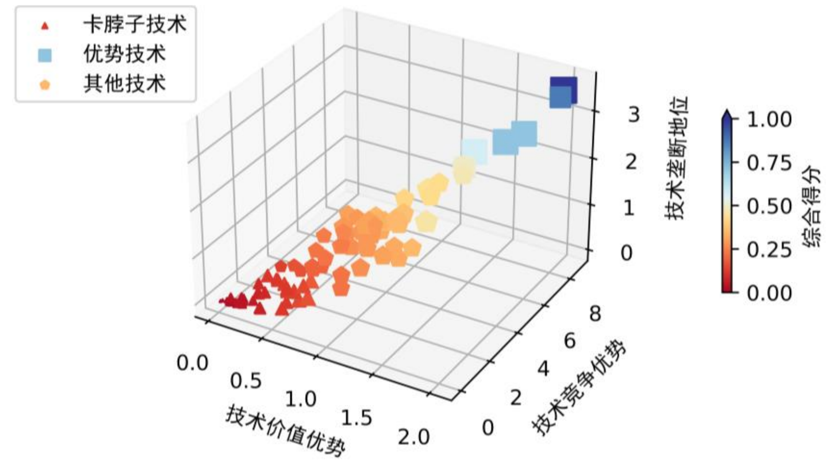


图 3 数控机床领域“卡脖子”技术识别图谱

从图 3 中可以看出我国在数控机床领域的优势技术很少，仅在 B23P23（数控组合机床）、B23P15（金属成形机床）、B24B55（磨床或抛光机的安全装置）、B08B1（数控机床自动清洗装置）、B24B29（数控机床抛光装置）、B24B37（研磨机床或装置）、B08B3（数控机床清洁方法）方向的综合得分较高，具有较大优势，但是这些技术的关键核心指数相对较低。识别出 34 项潜在“卡脖子”技术，通过 IPC 分类体系及相关专利的解读确定技术名称，如表 3 所示。可以看出我国在数控机床技术领域存在大量潜在“卡脖子”技术，主要集中在 B23Q（数控机床关键功能部件）、G05B（数控机床控制或调节系统）、B23B（车削或镗削数控机床）及 G06F（电数字数据处理）等领域，且综合得分较低，被“卡脖子”的程度严重。

表 3 数控机床领域潜在“卡脖子”技术方向

排序	IPC 大组	技术方向	综合得分	排序	IPC 大组	技术方向	综合得分
1	G06F15	通用数值控制设备	0.00	18	G01B21	特定类型计量装置	0.08
2	G05B9	安全控制装置	0.01	19	G01B7	基于电或磁的计量设备	0.09
3	H02P29	伺服电机控制技术	0.02	20	G06F9	程序控制装置或软件系统	0.09
4	G05D3	定位控制系统	0.02	21	G05B19	数字控制系统	0.11
5	B25J13	机械手控制系统	0.02	22	B23Q39	复合数控加工机床	0.11
6	H02P5	电动机同步控制装置	0.02	23	G05B13	自适应控制系统	0.12
7	B23Q35	仿形加工控制系统	0.04	24	G01D5	传感器组件	0.12
8	B23Q41	金属加工机床	0.04	25	B23B7	自动车床或半自动车床	0.12
9	B23Q15	进给运动、切削速度或位置自动控制系统	0.04	26	B25J19	机械手附属装置	0.12
10	G06F19	CNC 控制器	0.04	27	B23Q16	刀具或工件精确定位装置	0.12
11	B23B3	车床或车削设备	0.04	28	B23H7	放电加工装置	0.13
12	G05B15	计算机控制系统	0.05	29	G06Q50	数控加工模拟装置	0.13
13	G05B23	故障监测装置	0.05	30	B21D28	冲压穿孔设备	0.14
14	G06F3	数据接口装置	0.06	31	B23Q17	指示或测量装置	0.14
15	B25J9	程序控制机械手	0.07	32	B24B49	磨床测量或校准装置	0.15
16	B23B1	车削加工方法	0.07	33	B23G1	螺纹切制设备	0.16
17	G05B11	自动控制器	0.07	34	B23B25	车床的附件和辅助装置	0.18

根据这些潜在“卡脖子”技术方向的测度指标和综合得分情况，使用镝数图表工具绘制箱线图（详见图 4）。可以看出，技术价值优势指标数据分布相对均衡，集中在 0.2~0.55 之间，并且中位数相对其他指标最高（0.36）；在技术竞争优势方面，虽然数据分布较为集中，但是中位数较低（0.29），且存在异常值；技术垄断地位指标的离散度最大，数据范围进一步扩大至 0.06~0.56 区间，且中

位数进一步降低（0.2）；从自主可控能力指标看，数据分布集中但是总体偏低，主要位于 0.1~0.21 范围；从综合得分来看，数据分布更加集中，主要位于 0.04~0.12 的区间，且中位数非常低（仅为 0.08），表明这些技术方向存在显著的“卡脖子”风险。

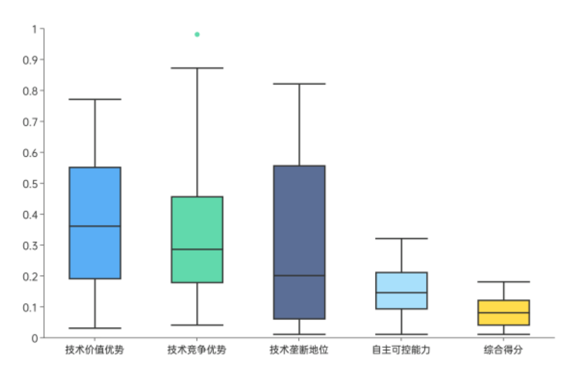


图 4 数控机床领域“卡脖子”技术识别特征分析

总体来看我国在数控机床“卡脖子”技术领域存在一定的技术积累，然而技术竞争优势不足，技术集中度低、自主可控能力差，形成被“卡脖子”问题的主要原因还是技术创新实力不足。但该结果并不表明自主可控能力低就必然属于“卡脖子”技术，我们应高度重视基础研究和自主创新能力的重要性，同时也要充分发挥后发国家的比较优势，通过快速消化吸收这些依赖的技术并形成创新能力，也是突破“卡脖子”技术的重要途径[25]。

3.7 识别结果验证

美国构建了一个管制依据多样、执行机构庞大、管制措施严密的出口管制体系，而且将国内单边体系与国际多边体系深入融合，内外联动，试图把控全球范围内的出口管制规制的话语权和主导权，而欧盟及日韩等其他国家的出口管制政策一般追随美国的政策。美国商业出口管制清单（CCL）中涉及到数控机床的条例集中在 2B991、2D002 及 2D003 条款，主要包括：①数控系统；②能够实时处理、自动计算、自适应控制、运行 CAD 数据的运动控制模块；③两轴以上可同时协调控制或具有高定位精度的数控机床；④用于去除或切割金属、陶瓷或复合材料的机床；⑤数控单元工作软件。可以发现这些内容分别与本研究识别出的 G05B19、B23Q15、H02P5、B23Q16、B23B3、G06F9 等方向基本吻合，验证了本方法的可靠性和可用性。然而并非所有潜在“卡脖子”技术方向都会被列入 CCL 清单，这是因为是否最终被纳入出口管制清单还受产业分布、政治、经济等其他因素影响，而本研究重点关注技术层面的“卡脖子”问题，因此识别出的技术方向更加全面，且技术粒度更细，能够为我国战略性新兴产业的“卡脖子”技术风险动态识别和情报预警提供方法论支持。

4 总结与讨论

本文从“卡脖子”技术形成机理和内涵特征出发，基于技术差距及技术经济安全的视角提出一套系统的“卡脖子”技术识别模型。该模型首先以全球发明专利文献作为研究对象，基于技术共现网络遴选关键核心技术；其次，从技术价值、技术竞争、技术垄断和自主可控这四个维度建立起“卡脖子”技术识别指标体系，运用 CRITIC-TOPSIS 综合评价的方法对各识别指标进行赋权和评价，并以此为基础遴选优势技术和潜在“卡脖子”技术；最后，以数控机床技术领域为例进行实证研究，验证了方法的有效性和合理性。主要取得了以下方面进展：

第一，本研究从“卡脖子”技术内涵特征及形成机理出发，基于技术差距及

技术经济安全的视角，探索了关键核心技术领域“卡脖子”技术识别的本质特征，重点从“卡脖子”技术的形成源头出发，创新性地将技术层面的自主可控能力纳入量化识别模型，丰富了学界对“卡脖子”技术的理论认识。

第二，以 IPC 大组作为研究对象，基于技术共现网络特征遴选关键核心技术，从技术价值、技术竞争、技术垄断和自主可控这四个维度设计“卡脖子”技术识别指标体系，采用 CRITIC-TOPSIS 综合评价的方法构建了多指标综合评价模型，使得识别结果更加系统、规范、客观。在此基础上，进一步提出了通用的优势技术和“卡脖子”技术遴选方法，降低了领域依赖性。

第三，本模型不仅能够识别出“卡脖子”技术，还能够实现我国相对优势技术的精准量化识别，可以为国家合理化科技布局和技术贸易安全管理提供参考依据，并为产业突破“卡脖子”问题提供情报和动态预警支持。

本研究为定量识别“卡脖子”技术辅助专家决策提出了一套行之有效的方法，具有较高可行性和可解释性，然而仍然存在一些不足：首先，除了已经受到限制需要及时攻克的核心技术外，还应考虑长远发展的“卡脖子”技术问题，对于面向未来产业的新兴技术领域，由于其具有高度不确定性，需要结合技术预见的方法进一步研究，而这些未被纳入本研究的范畴；此外，专利数据库虽然已经涵盖了大部分的发明成果，但是未能考虑“卡脖子”技术的基础研究水平，如果我国在基础研究方面培育起较大优势，那么被“卡脖子”的风险也会降低。未来可基于多源数据进行技术挖掘，更为准确地识别“卡脖子”技术及其发展脉络，为突破“卡脖子”技术提供情报支持。

参考文献：

[1] 罗超亮，符正平，刘冰，等. 战略性新兴产业国际贸易网络的演化及动力机制研究[J]. 国际贸易问题, 2022, 471(03): 121-139.

[2] 高旭，白如江，王效岳. 面向“卡脖子”技术场景的科技前沿发现与态势演化研究——以集成电路技术为例[J]. 图书情报工作, 2023, 67(04): 40-54.

[3] 戴魁早，方杰炜. 贸易壁垒对出口技术复杂度的影响——机制与中国制造业的证据[J]. 国际贸易问题, 2019, 444(12): 136-154.

[4] 董汀. 拜登政府科技政策新范式[EB/OL]. [2022-05-20]. https://www.163.com/dy/article/H6JOISRL0511DV4H.html.

[5] 中国工程科技发展战略研究院. 2021 中国战略性新兴产业发展报告[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

[6] 周波，冷伏海. 技术识别研究进展[J]. 情报学进展, 2022, 14(00): 315-348.

[7] 陈劲，阳镇，朱子钦. “十四五”时期“卡脖子”技术的破解：识别框架、战略转向与突破路径[J]. 改革, 2020, 322(12): 5-15.

[8] 邢冬梅. “卡脖子”技术问题的成因与规避——技术轨道的分析视角[J]. 国家治理, 2020(45): 21-25.

[9] 谭劲松，宋娟，王可欣，等. 创新生态系统视角下核心企业突破关键核心技术“卡脖子”——以中国高速列车牵引系统为例[J]. 南开管理评论, 2022(5): 1-28.

[10] 周琪. 高科技领域的竞争正改变大国战略竞争的主要模式[J]. 太平洋学报, 2021, 29(01): 1-20.

[11] 杨玉良. “卡脖子”问题刍议[J]. 科学与社会, 2020, 10(04): 1-4.

[12] 张治河，苗欣苑. “卡脖子”关键核心技术的甄选机制研究[J]. 陕西师范大学

学报(哲学社会科学版), 2020, 49(06): 5-15.
[13] 李昱璇, 方卫华. “卡脖子”技术概念辨析——内生性矛盾、国家主体与外部限制的共同建构[J/OL]. 科学学研究.
[14] 汤志伟, 李昱璇, 张龙鹏. 中美贸易摩擦背景下“卡脖子”技术识别方法与突破路径——以电子信息产业为例[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(01): 1-9.
[15] 郑国雄, 李伟, 刘溉, 等. 基于德尔菲法和层次分析法的“卡脖子”关键技术甄选研究——以生物医药领域为例[J]. 世界科技研究与发展, 2021, 43(03): 331-343.
[16] 赵君彦, 赵婧姝. 奶业“卡脖子”关键技术甄选机制及培育路径——基于产业链与创新链协同视角[J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(04): 323-328.
[17] 邓岩, 陈燕娟. 种源“卡脖子”问题的识别、成因与破解路径研究——以农作物种业为例[J]. 农业现代化研究, 2022, 43(01): 20-28.
[18] 李昱璇, 汤志伟. “卡脖子”技术问题的综合解决方案——以 S 省为例[J]. 中国科技论坛, 2022, 309(01): 7-13.
[19] 唐恒, 邵泽宇, 蔡兴兵, 金志成. 专利视角下“卡脖子”技术短板甄选研究[J]. 中国发明与专利, 2021, 18(01): 54-59.
[20] 董坤, 白如江, 许海云. 省域视角下产业潜在“卡脖子”技术识别与分析研究——以山东省区块链产业为例[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(11): 197-203.
[21] 江瑶, 陈旭, 胡斌. “卡脖子”关键核心技术两阶段漏斗式甄选模型构建及应用研究[J/OL]. 情报杂志.
[22] POSNER M V. International trade and technical change[J]. Oxford economic papers, 1961, 13(3): 323-341.
[23] 杨武, 杨大飞, 琚云. 技术差距理论框架下产业技术安全测度研究——以 5G 移动通信产业为例[J]. 科技进步与对策, 2019, 468(08): 60-67.
[24] KUMAR S, RUSSELL R R. Technological change, technological catch-up, and capital deepening: relative contributions to growth and convergence[J]. American economic review, 2002, 92(3): 527-548.
[25] 刘志鹏, 程燕林, 代涛, 等. 技术依赖形成和影响经济安全的机制研究——基于技术经济安全视角[J]. 科学学研究, 2023, 41(06): 1006-1013.
[26] 周磊, 吕璐成, 穆克亮. 中美科技博弈背景下的卡脖子技术识别方法研究[J/OL]. 情报杂志.
[27] 赵雪峰, 吴德林, 吴伟伟, 等. 基于深度学习与多分类轮询机制的高质量“卡脖子”技术专利识别模型——以专利申请文件为研究主体[J/OL]. 数据分析与知识发现.
[28] 程燕林, 代涛, 丁予业, 等. 技术经济安全：研究重点、演化机理和评估框架[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(04): 541-552.
[29] 习近平. 论科技自立自强[M]. 北京: 中央文献出版社, 2023.
[30] 李瑞茜, 陈向东. 基于专利共类的关键技术识别及技术发展模式研究[J]. 情报学报, 2018, 37(05): 495-502.
[31] 黄鲁成, 刘春文, 吴菲菲, 等. 基于 NPCIA 的核心技术识别模型及应用研究[J]. 科学学研究, 2020, 38(11): 1998-2007.
[32] 王秀红, 高敏. 基于 BERT-LDA 的关键技术识别方法及其实证研究——以农业机器人为例[J]. 图书情报工作, 2021, 65(22): 114-125.
[33] 许学国, 桂美增. 基于机器学习的新能源汽车核心技术识别及布局研究[J].

科技管理研究,2021,41(09):96-106.
[34] 陈伟，林超然，孔令凯，等. 基于专利文献挖掘的关键共性技术识别研究[J]. 情报理论与实践, 2020, 43(02): 92-99.
[35] BRIN S, PAGE L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine[J]. Computer networks and ISDN systems, 1998, 30(1-7): 107-117.
[36] 杨武，杨大飞. 基于专利数据的产业核心技术识别研究——以 5G 移动通信产业为例[J]. 情报杂志, 2019, 38(03): 39-45.
[37] 范书琴，刘国新. 专利质量视角下国外技术锁定的模糊识别研究——以锂电池隔膜技术为例[J]. 科学学与科学技术管理, 2022, 43(12): 132-152.
[38] 陈思思，何俊卿，郑祥，等. 基于评估工具的专利价值评估发展现状研究[J]. 科技管理研究, 2022, 42(21): 176-184.
[39] 徐霞，吴福象，王兵. 基于国际专利分类的关键核心技术识别研究[J]. 情报杂志, 2022, 41(10): 74-81.
[40] 胡海容，石冰琪，周孟蓉. 基于 HHI 指数和 E 指数的我国区块链技术专利集中度测算研究[J]. 世界科技研究与发展, 2021, 43(5): 523-534.
[41] 郑玉荣，吴新年，田晓阳，等. 基于产业尺度的核心专利判别方法研究——以镍基高温合金专利为例[J]. 情报理论与实践, 2014, 37(07): 81-85.
[42] 马铭，王超，许海云，等. 面向语义信息分析的多层次技术演化轨迹识别方法研究[J]. 图书情报工作, 2022, 66(04): 103-117.
[43] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L, Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method[J]. Computers and operations research, 1995, 22(7): 763-770.
[44] SHIH H S, SHYUR H J, LEE E S. An extension of TOPSIS for group decision making[J]. Mathematical & computer modelling, 2007, 45(7):801-813.
[45] 吕璐成，韩涛，陈芳，等. 美国商业管制清单与专利自动映射方法及实证研究[J]. 情报学报, 2022, 41(1): 50-61.
[46] 梁帅，高继平. 产业技术结构与“卡脖子”技术特征——以高端数控机床为例[J]. 科技导报, 2021, 39(24): 75-83.

作者贡献说明：曹琨：进行实验，论文起草；吴新年：提出研究思路，设计研究方案；白光祖：实验结果分析；郑玉荣：论文起草，修改论文；靳军宝：论文最终版本修订；李莉：识别结果验证。

Identification of “Neck Stuck” Technologies Based on Patent Literature: A Case Study in the Field of CNC Machine Tools

Cao Kun[1,2], Wu Xinnian[1,2], Bai Guangzu[1], Zheng Yurong[1], Jin Junbao[1], Li Li[3]
1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000
2. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049
3. Chinese Academy of Engineering Innovation Strategy, Beijing, 100088

Abstract: **[Purpose/Significance]** “Neck Stuck” technology is the key point that restricts the high-quality development of China’s strategic emerging industries at the present stage. To ensure the independent security control of the industrial chain, it is necessary to identify the “Neck Stuck” technology efficiently and accurately. **[Method/Process]** This study utilizes patent literature as the main data source. Firstly,

key core technologies are selected based on technical co-occurrence network measurements. Secondly, the relationship between latecomer advantages and independent innovation capabilities is comprehensively considered from the perspective of technical gaps and technical-economic security. A “Neck Stuck” technology identification index system is designed across four dimensions: technical value advantage, technical competition advantage, technical monopoly status, and independent controllability. Then, a systematic “Neck Stuck” technology identification model is constructed using the CRITIC-TOPSIS method. Finally, empirical research is conducted in the field of numerical control machine tools. **[Result/Conclusion]** The results of the identification process using the proposed method in this study reveal the existence of 34 potential “Neck Stuck” technologies in the field of numerical control machine tools in China. These technologies are primarily concentrated in the control or adjustment system, key functional components, turning or boring numerical control machine tools, and digital data processing. A comparison of these findings with the U.S. Commerce Control List confirms the high degree of consistency, thus validating the feasibility and reliability of the proposed method.
Keywords:“Neck Stuck” technology CRITIC-TOPSIS method technology identification CNC machine tools